

На правах рукописи

Сафина Алсу Мансуровна

**Спиновая релаксация и фазовое расслоение
в слабодопированных купратах**

01.04.02 – теоретическая физика.

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Казань – 2004

Работа выполнена на кафедре теоретической физики
Казанского государственного университета им. В.И. Ульянова-Ленина
Министерства образования и науки РФ

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Кочелаев Борис Иванович

Официальные оппоненты:

— доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН,
профессор Изюмов Юрий Александрович

— доктор физико-математических наук,
профессор Косов Александр Александрович

Ведущая организация: Физико-технический институт им.
Е.К. Завойского КНЦ РАН

Защита состоится 23 декабря 2004 г в 14.30 на заседании
диссертационного совета Д 212.081.15 при Казанском государственном
университете им. В.И. Ульянова-Ленина по адресу: 420008, г. Казань, ул.
Кремлевская, д. 18.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им.
Н.И. Лобачевского Казанского государственного университета.

Автореферат разослан «20» ноября 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.ф.-м.н., профессор

Еремин М.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Выяснение природы высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) является одной из важнейших задач физики конденсированного состояния. С момента открытия ВТСП-соединений [1] опубликовано огромное количество экспериментальных и теоретических работ. Однако до сих пор не предложен механизм сверхпроводимости, описывающий все многообразие необычных свойств этих материалов.

Особое внимание уделяется изучению магнитных свойств медно-оксидных плоскостей в связи с общепризнанным мнением об их определяющей роли в механизме высокотемпературной сверхпроводимости. Одним из наиболее мощных и универсальных методов исследования магнетизма конденсированных сред является электронный парамагнитный резонанс (ЭПР), который сыграл большую роль в изучении свойств обычных сверхпроводников с парамагнитными примесями. Но, несмотря на то, что двухвалентные ионы меди дают хороший сигнал при добавлении в диэлектрические кристаллы, все попытки наблюдения ЭПР в сверхпроводящих купратах и их родительских соединениях оказались безрезультатными. Возможность наблюдения электронного парамагнитного резонанса в ВТСП-соединениях, как и в случае обычных сверхпроводников, дает использование парамагнитных примесей.

В случае сильного взаимодействия между парамагнитными центрами и ионами меди важную роль играет эффект электронного узкого горла. Он позволяет изучать релаксацию медной подсистемы в решетку, в то время как интенсивность сигнала контролируется спиновой восприимчивостью парамагнитной примеси. Но если режим электронного узкого горла хорошо изучен для случая изотропного обменного взаимодействия, то случай анизотропного обмена, необходимый для описания взаимодействия медной спиновой подсистемы с локализованными парамагнитными центрами, образованными носителями заряда при их малой концентрации, ранее не изучался.

Важной проблемой, связанной с объяснением необычных свойств ВТСП-материалов, является объяснение механизма перехода этих соединений из антиферромагнитной диэлектрической в металлическую и сверхпроводящую фазы при добавлении носителей заряда в CuO_2 -плоскости. Следовательно, существенную роль играет понимание процессов, происходящих в купратах на начальных этапах допирования. В последнее время появляется все большее количество работ, свидетельствующих о неоднородном распределении носителей тока при допировании, которое приводит к образованию областей с высокой и низкой их концентрацией. Микроскопические методы, такие как электронный парамагнитный резонанс, могут помочь в изучении вопроса электронного фазового расслоения в ВТСП-материалах.

Цель работы

Целью диссертационной работы является исследование спиновой кинетики и магнитных свойств сверхпроводящих купратов на начальных этапах допирования. Исследование состоит в решении следующих задач:

- Исследование режима электронного узкого горла в случае анизотропного обменного взаимодействия для описания коллективного движения медной спиновой подсистемы и подсистемы локализованных парамагнитных центров, образованных носителями заряда при их малой концентрации.
- Изучение квазилокального движения дырки в плоскости CuO_2 в рамках расширенной модели Хаббарда в пределе сильного отталкивания.
- Объяснение необычного поведения ЭПР сигнала, наблюдавшегося в слабодопированных образцах $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_{0.98}\text{Mn}_{0.02}\text{O}_4$.
- Исследование влияния взаимодействия медной спиновой подсистемы с ионами гадолиния (для Gd_2CuO_4) и марганца (для $\text{La}_2\text{CuO}_4:\text{Mn}$) на интенсивность сигнала антиферромагнитного резонанса.

Научная новизна

Выведены кинетические уравнения, выражения для резонансных частот, эффективного g-фактора и эффективной ширины линии ЭПР в случае анизотропного обменного взаимодействия между медной спиновой подсистемой и спиновой подсистемой локализованных парамагнитных центров. Эти результаты применимы также к случаю анизотропного обмена

между парамагнитными примесями и электронами проводимости в металле.

Изучена роль трехчастичных взаимодействий в эффективном гамильтониане, выведенном из гамильтониана расширенной модели Хаббарда в пределе сильного отталкивания двух дырок на одном медном узле.

Возможность существования фазового расслоения в медно-оксидных плоскостях впервые изучается с помощью метода электронного парамагнитного резонанса.

Исследовалось влияние взаимодействия медной спиновой подсистемы с парамагнитными ионами на интенсивность сигнала антиферромагнитного резонанса.

Практическая ценность

Полученные в диссертации результаты объясняют эксперименты по наблюдению ЭПР в слабодопированных купратах без добавления парамагнитных примесей и с добавлением парамагнитных примесей, сильно взаимодействующих с медной спиновой подсистемой. Предложенный в работе метод дает возможность изучать фазовое расслоение в медно-оксидных плоскостях с помощью электронного парамагнитного резонанса.

Положения, выносимые на защиту

1. Методом неравновесного статистического оператора Зубарева [2] были получены уравнения типа Блоха-Хасегавы для случая анизотропного обменного взаимодействия между медной спиновой подсистемой и спиновой подсистемой локализованных

парамагнитных центров, образованных носителями заряда на начальных этапах допирования. Выведены выражения для резонансных частот, эффективного g-фактора и эффективной ширины линии.

2. Было изучено квазилокальное движение дырки в плоскости CuO_2 , удерживаемой кулоновским потенциалом, создаваемым атомом примеси. Построена фазовая диаграмма состояний системы в зависимости от соотношений между параметрами.
3. Исследовалось необычное поведение ЭПР сигнала, наблюдавшегося в слабодопированных образцах $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_{0,98}\text{Mn}_{0,02}\text{O}_4$ при $0,01 < x < 0,06$. Присутствие в спектре двух резонансных линий было объяснено наличием фазового расслоения в плоскостях CuO_2 . Предложен механизм образования богатых дырками областей, начальным этапом которого является образование биполяронов за счет взаимодействия через поле фононов.
4. Получены выражения для частот АФМР для Gd_2CuO_4 и La_2CuO_4 . Было исследовано влияние взаимодействия медной спиновой подсистемы с ионами гадолиния и марганца на интенсивность сигнала антиферромагнитного резонанса.

Личный вклад автора

Постановка задач принадлежит научному руководителю. Вывод кинетических уравнений, их решение, расчеты энергетических спектров и состояний, расчеты энергии

взаимодействия поляронов выполнялись соискателем. Обработка экспериментальных данных и их подгонка проводились соискателем совместно с А. Шенгелая и М. Bruun. Написание статей проводилось совместно с научным руководителем и группой Алекса Мюллера при активном участии соискателя.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах кафедры теоретической физики КГУ и на семинарах группы Х.Келлера в физическом институте Цюрихского университета. Были сделаны доклады на следующих конференциях: Российская молодежная научная школа «Новые аспекты применения магнитного резонанса», Казань, 1-3 ноября 2001г; XI-th Feofilov symposium on spectroscopy of crystals activated by rare earth and transition metal ions, Kazan, September 24-28, 2001; Международная зимняя школа физиков-теоретиков, Кунгур, 24 февраля-2 марта 2002 г; International conference on Modern problems of high T_c superconductivity, September 2002, Yalta, Ukraine; International conference on Dynamic inhomogeneities in complex oxides, June 14-20, 2003, Bled, Slovenia; Theoretical trends in low-dimensional magnetism LDM2003, July 23-25, Firenze, Italy; Nanoscale properties of condensed matter probed by resonance phenomena, August 15-19, 2004, Kazan, Russia; Юбилейная научная конференция физического факультета, 10 ноября 2004 г., Казань, Россия и ежегодные итоговые научные конференции физического факультета.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 15 работ, в том числе 3 статьи и 12 тезисов докладов.

Структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, содержащего 94 наименования. Работа изложена на 119 страницах, включая 18 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, сформулированы цель и задачи исследования, а также дано краткое описание работы.

Первая глава носит обзорный характер. В ней кратко рассказывается о наиболее значимых теориях, предложенных для описания высокотемпературной сверхпроводимости, о моделях, описывающих электронные состояния в CuO_2 -плоскостях, и моделях элементарных возбуждений. Приводится также обзор работ о применении метода магнитного резонанса для исследования обычных и высокотемпературных сверхпроводников и описывается режим электронного узкого горла (ЭУГ), который играет существенную роль в спиновой динамике этих материалов, в случае изотропного обменного взаимодействия.

Вторая глава посвящена изучению режима электронного узкого горла в случае анизотропного обменного взаимодействия для описания коллективного движения медной спиновой подсистемы и подсистемы локализованных парамагнитных центров, образованных

носителями заряда при их малой концентрации. Скорость релаксации этих подсистем друг в друга намного больше скоростей их релаксаций в решетку, и в системе наблюдается эффект ЭУГ, благодаря которому при малых концентрациях дырок удается наблюдать электронный парамагнитный резонанс [3]. В режиме ЭУГ две подсистемы сначала объединяются и вместе релаксируют в решетку, и в изотропном случае скорости релаксации двух подсистем друг в друга не дает вклада в ширину линии. В этой части работы методом неравновесного статистического оператора Зубарева [2] выводятся уравнения типа Блоха-Хасегавы [4] для поперечных компонент намагниченностей в случае анизотропного обменного взаимодействия между спиновыми подсистемами, получены выражения для эффективной ширины линии и эффективного g -фактора. Анизотропная часть обменного взаимодействия дает вклад как в ширину линии, так и в g -фактор, и скорости релаксации подсистемы локализованных парамагнитных центров в медную спиновую подсистему и обратно $\Gamma_{s\sigma}$ и $\Gamma_{\sigma s}$ присутствуют в выражении для эффективной ширины линии, т.к. полный спин не коммутирует с гамильтонианом

$$H_{\text{int}} = -\sum_i \left\{ J_{s\sigma}^{\perp} \left[S_i^x \sigma^x(\mathbf{r}_i) + S_i^y \sigma^y(\mathbf{r}_i) \right] + J_{s\sigma}^{\parallel} S_i^z \sigma^z(\mathbf{r}_i) \right\}. \quad (1)$$

Так как скорости релаксации подсистемы локализованных парамагнитных центров в медную спиновую подсистему и обратно $\Gamma_{s\sigma}$ и $\Gamma_{\sigma s}$ намного превосходит скорость релаксации каждой из подсистем в решетку, вклад анизотропной части может стать

основным, в корне меняя результаты для ширины линии и g -фактора в изотропном случае.

Все вычисления этой главы справедливы не только для описания поведения локализованных парамагнитных центров, взаимодействующих анизотропным образом с медной подсистемой в CuO_2 -плоскости, но и для описания взаимодействующих анизотропным образом локализованных моментов с электронами проводимости в металле.

В третьей главе исследуется квазилокальное движение дырки в плоскости CuO_2 , удерживаемой кулоновским потенциалом, создаваемым атомом примеси. Исследование проводилось в рамках расширенной модели Хаббарда в пределе сильного отталкивания двух дырок на одном ионе меди при различных параметрах системы. В п.3.2.2-3.2.3 расчеты производилось без учета трехчастичных взаимодействий. В случае, когда интеграл перескока t мал по сравнению с интегралами антиферромагнитного

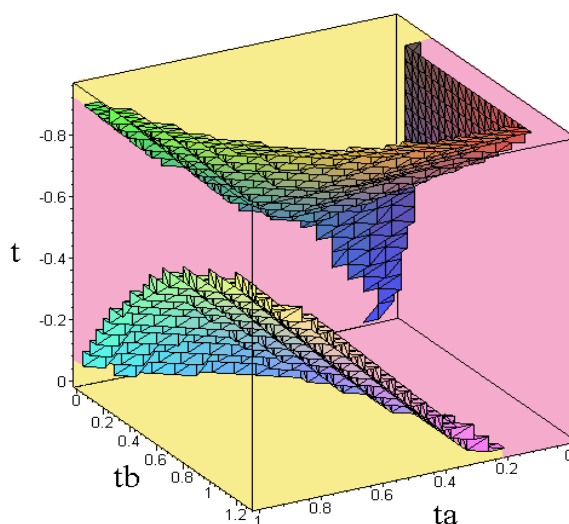


Рис. 1. Трехмерная фазовая диаграмма системы, состоящей из четырех медных и четырех кислородных узлов и дырки, движущейся внутри такого кластера, при типичных значениях параметров $J=0.132$, $J_0=0.929$ в зависимости от соотношения между интегралом перескока t и постоянными трехчастичного взаимодействия (t_a и t_b) Светлые области соответствуют антиферромагнитному состоянию, более темные-ферромагнитному.

взаимодействия Cu-Cu и Cu-O (J и J_0), т.е. дырка почти «заморожена» и квазилокализована на одном из ионов кислорода, нижнему уровню энергии соответствует состояние системы со спином $1/2$, и магнитные свойства системы мало меняются вследствие подвижности дырки. Когда $t \gg J_0 \gg J$, т.е. кинетический член велик по сравнению с взаимодействием Cu-Cu и Cu-O, и дырка почти «свободно» движется по кластеру, магнитные свойства кластера существенно модифицируются, и возникает конкуренция между антиферромагнитным порядком и кинетикой. При достаточно большой кинетической энергии в системе возникает ферромагнитный порядок (нижнему уровню энергии соответствует состояние со спином $3/2$).

В п. 3.2.4 с учетом трехчастичных взаимодействий были вычислены состояния системы в зависимости от соотношения между интегралом прямого перескока дырки с кислорода на кислород и параметрами трехчастичного взаимодействия, построена соответствующая фазовая диаграмма (рис 1).

В § 3.3 вычисляются волновые функции и уровни энергии квазичастицы, состоящей из кислородной дырки и дырок на двух ближайших медных узлах (трехспиновый полярон [5]), в рамках расширенной модели Хаббарда.

В четвертой главе излагается работа, проведенная совместно с группой Алекса Мюллера, в которой изучался электронный парамагнитный резонанс в системе $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ с добавлением марганца, замещающего 2% ионов меди в CuO_2 -плоскостях при концентрациях стронция $0,01 < x < 0,06$. Исследования показали, что

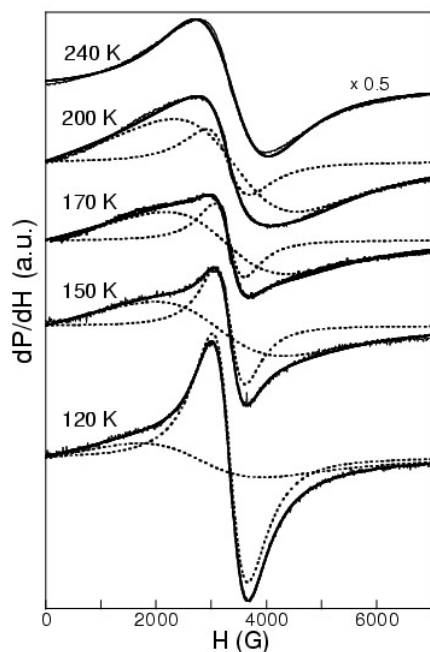


Рис. 2. Эволюция спектра ЭПР $\text{La}_{1.97}\text{Sr}_{0.03}\text{Cu}_{0.98}\text{Mn}_{0.02}\text{O}_4$ с увеличением температуры. Пунктирными линиями показаны вклады от узкой и широкой линий.

при такой малой концентрации дырок спектр ЭПР хорошо описывается суммой двух лоренцевых компонент с разными ширинами линий, то есть состоит из двух линий (рис. 2) – широкой и узкой. Было сделано важное наблюдение, что поведение узкой линии практически не зависит от массы изотопа кислорода, в то время как широкая линия проявляет ярко выраженный изотопический эффект. Температурная зависимость интенсивностей этих линий для различных концентраций стронция

изображена на рис. 3. Видно, что их поведение существенным образом отличается. Если интенсивность широкой линии имеет максимум и затем резко уменьшается с понижением температуры, то интенсивность узкой линии при высоких температурах очень мала, но начинает быстро расти при понижении температуры ниже $\sim 150\text{K}$. Мы предположили, что узкая и широкая линия ЭПР соответствуют областям с локально *высокой и низкой концентрацией дырок*. Это предположение подтверждается отсутствием изотопического эффекта для узкой линии. В работе [6] было показано, что влияние массы изотопа кислорода на ширину линии ЭПР уменьшается при приближении концентрации дырок к

оптимальному допированию. Квазиэкспоненциальный рост интенсивности узкой линии указывает на наличие энергетической щели, связанной с образованием областей с высокой концентрацией дырок.

Мы предположили, что механизм, обуславливающий такое фазовое расслоение, определяется электрон-фононным взаимодействием. Точнее, что оно возникает благодаря анизотропному взаимодействию между трехспиновыми поляронами через поле фононов. В п.4.3.2 была подсчитана энергия этого взаимодействия. Выяснилось, что это оно является сильно анизотропным. При определенной взаимной ориентации поляроны притягиваются, и становится возможным образование биполяронов. Грубая оценка энергии образования биполяронов для стандартного набора параметров ($\varepsilon = \varepsilon_p - \varepsilon_d = 3\text{eV}$, $U_d = 8\text{eV}$, $U_p = 4\text{eV}$, $V_{pd} = 1.2\text{eV}$, $t = 1.4\text{ eV}$) дает величины порядка 120 К (760 К без учета p - d -отталкивания). Из-за сильной

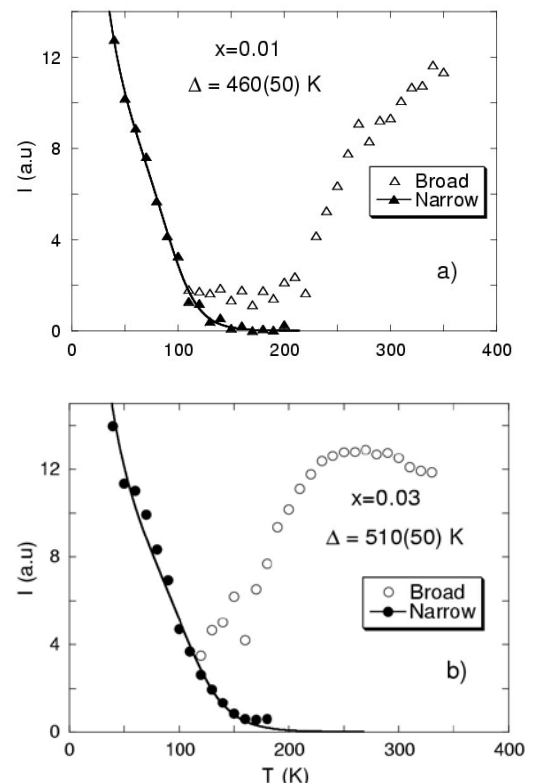


Рис. 3. Температурная зависимость интенсивностей узкой и широкой линий ЭПР $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_{0.98}\text{Mn}_{0.02}\text{O}_4$ для различных концентраций стронция: (a) $x=0.01$, (b) $x=0.03$. Сплошная линия представляет собой подгонку данных с использованием приведенной в тексте модели.

анизотропии взаимодействия образование биполяронов может стать начальным этапом для формирования одномерных образований в CuO_2 -плоскости (выстраивания страйпов).

В п. 4.3.3 мы рассчитали интенсивность узкой линии ЭПР для областей с высокой концентрацией дырок. Она должна быть пропорциональна объему образца, занятому областями с высокой концентрацией дырок, так как интенсивность системы сильно взаимодействующих Cu и Mn, находящейся в режиме ЭУГ, определяется спиновой восприимчивостью марганца [7], равномерно распределенного в образце. Объем богатых дырками областей пропорционален количеству биполяронов. Количество биполяронов оценим способом, предложенным в работе [8]. Результаты подгонки можно видеть на рисунке 3. Наши расчеты дают значение для величины $\Delta=460(50)$, которое практически не зависит от уровня допирования. Следовательно, величина энергетической щели, необходимая для описания экспериментально наблюдаемой температурной зависимости ширины линии ЭПР имеет тот же порядок, что и вычисленная нами энергия образования биполяронов, и в рамках нашей модели мы можем объяснить как возникновение узкой линии ЭПР, так и особенности ее поведения.

В § 4.4 рассматривалось необычное поведение широкой линии. Исчезновение этой линии при понижении температуры было объяснено возникновением локального магнитного порядка в областях с низкой концентрацией дырок, что приводит к исчезновению сигнала ЭПР от этих областей.

В пятой главе были микроскопически выведены кинетические уравнения для намагниченностей в случае существования в системе антиферромагнитного упорядочения. Получены выражения для резонансных частот для двухподрешеточного антиферромагнетика типа «легкая плоскость» в случаях, когда вектор слабого ферромагнетизма и внешнее поле лежат в этой плоскости (в применении к системе Gd_2CuO_4) и перпендикулярны ей (для La_2CuO_4) без учета и с учетом взаимодействия медной подсистемы с ионами гадолиния и ионами марганца. При учете взаимодействия в Gd_2CuO_4 медной подсистемы с ионами гадолиния происходит перенормировка магнитного поля на ионах меди. При добавлении ионов марганца в медно-оксидную плоскость La_2CuO_4 перенормируется не только магнитное поле, но и обменный интеграл Cu-Cu.

При изучении влияния взаимодействия медной спиновой подсистемы с ионами гадолиния (для Gd_2CuO_4) и марганца (для $La_2CuO_4:Mn$) на интенсивность сигнала антиферромагнитного резонанса выяснилось, что в гадолиниевой системе значительного увеличения интенсивности сигнала антиферромагнитного резонанса не происходит (что противоречит предположению, сделанному в работе [9]). Для $La_2CuO_4:Mn$ найдены условия максимального увеличения интенсивности сигнала антиферромагнитного резонанса при концентрации марганца около 6%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом неравновесного статистического оператора Зубарева получены уравнения типа Блоха-Хасегавы для случая анизотропного

обменного взаимодействия между медной спиновой подсистемой и спиновой подсистемой локализованных парамагнитных центров, образованных носителями заряда на начальных этапах допирования. В явном виде получены выражения для кинетических коэффициентов и скоростей релаксации. Выведены выражения для резонансных частот, эффективного g -фактора и эффективной ширины линии для режима электронного узкого горла. Анизотропная часть обменного взаимодействия дает вклад как в ширину линии, так и в g -фактор, и скорости релаксации локализованных моментов к электронам проводимости и обратно $\Gamma_{s\sigma}$ и Γ_{∞} не исчезают в выражении для эффективной ширины линии, т.к. полный спин не коммутирует с гамильтонианом системы. Вклад анизотропной части может стать основным, в корне меняя результаты для ширины линии и g -фактора в изотропном случае

Было проведено исследование квазилокального движения дырки в плоскости CuO_2 , удерживаемой кулоновским потенциалом, создаваемым атомом примеси. Исследование проводилось в рамках расширенной модели Хаббарда в пределе сильного отталкивания при различных параметрах системы. В случае, когда интеграл перескока t мал по сравнению с J и J_0 , т.е. дырка почти «заморожена» и квазилокализована на одном из ионов кислорода, нижнему уровню энергии соответствует состояние системы со спином $1/2$, и магнитные свойства системы мало меняются вследствие подвижности дырки. Когда $t \gg J_0 \gg J$, т.е. кинетический член велик по сравнению с взаимодействием Cu-Cu и Cu-O, и дырка почти «свободно» движется по кластеру, магнитные свойства кластера

существенно модифицируются, и возникает конкуренция между антиферромагнитным порядком и кинетикой. При достаточно большой кинетической энергии в системе возникает ферромагнитный порядок (нижнему уровню энергии соответствует состояние со спином $3/2$).

В рамках расширенной модели Хаббарда в пределе сильного отталкивания с учетом трехчастичных взаимодействий были вычислены состояния данной системы в зависимости от соотношения между интегралом перескока и параметрами трехчастичного взаимодействия, построена соответствующая фазовая диаграмма.

Были вычислены волновые функции и уровни энергии трехспинового полярона в рамках расширенной модели Хаббарда.

Исследовалось необычное поведение ЭПР сигнала, наблюдавшегося в слабодопированных образцах $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_{0,98}\text{Mn}_{0,02}\text{O}_4$ при $0,01 < x < 0,06$. Присутствие в спектре двух резонансных линий было объяснено наличием фазового расслоения в плоскостях CuO_2 . Поведение этих линий указывает на то, что сигнал с узкой резонансной линией соответствует металлическим областям с высокой концентрацией носителей заряда, а сигнал с широкой линией – антиферромагнитным областям с низкой концентрацией. Предложен механизм образования богатых дырками областей. Величина энергетической щели $\Delta=460(50)$, необходимая для описания экспериментально наблюдаемой температурной зависимости ширины линии ЭПР, имеет тот же порядок, что и энергия образования биполярона при взаимодействии трехспиновых

поляронов через поле акустических фононов. Предлагается объяснение необычной температурной зависимости интенсивности как узкой, так и широкой линий ЭПР.

Были получены и решены системы кинетических уравнений для спиновых переменных и получены выражения для резонансных частот для двухподрешеточного антиферромагнетика типа «легкая плоскость» в случаях, когда вектор слабого ферромагнетизма и внешнее поле лежат в этой плоскости (в применении к системе Gd_2CuO_4) и перпендикулярны ей (для La_2CuO_4).

Исследовалось влияние взаимодействия медной спиновой подсистемы с ионами гадолиния (для Gd_2CuO_4) и марганца (для La_2CuO_4) на интенсивность сигнала антиферромагнитного резонанса. Показано, что при учете взаимодействия медной подсистемы с ионами гадолиния происходит перенормировка магнитного поля на ионах меди. При добавлении ионов марганца в медно-оксидную плоскость La_2CuO_4 перенормируется не только магнитное поле, но и обменный интеграл Cu-Cu. В обоих случаях не выявлено значительного увеличения интенсивности сигнала антиферромагнитного резонанса при учете этого взаимодействия.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Kochelaev.B.I. Three-spin polarons and their elastic interaction in cuprates / B. I. Kochelaev, A. M. Safina, A. Shengelaya, H. Keller, K. A. Müller, K. Conder // Mod. Phys. Lett. B. – 2003. – v.17 – pp.415-421.

2. Кочелаев Б.И. Режим электронного узкого горла для парамагнитных примесей в металлах в случае анизотропного обменного взаимодействия / Б.И. Кочелаев, А.М. Сафина // ФТТ. – 2004. – т.46. – с.224-227.
3. Shengelaya A. Metallic phase in lightly doped $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ observed by electron paramagnetic resonance / A. Shengelaya, M. Bruun, B. I. Kochelaev, A. M. Safina, K. Conder, K. A. Müller // Phys. Rev. Lett. – 2004. – v.93. – 017001.
4. Сафина А.М. Режим электронного узкого горла для парамагнитных примесей в металлах в случае анизотропного обменного взаимодействия / А. М. Сафина, Б.И. Кочелаев // Программа российской молодежной научной школы «Новые аспекты применения магнитного резонанса». – Казань, 2001г. – С. 97-102.
5. Safina A.M. Quasi-local motion of the three-spin-polaron in cuprates / A.M. Safina, B.I. Kochelaev // Abstracts of XI-th Feofilov symposium on spectroscopy of crystals activated by rare earth and transition metal ions. – Kazan, 2001. – p.121.
6. Кочелаев Б.И. Спиновая релаксация и коллективное движение парамагнитных центров и электронов проводимости в металле, связанных анизотропным обменом / Б. И. Кочелаев, А. М. Сафина // Программа и тезисы докладов международной зимней школы физиков-теоретиков. – Кунгур, 2002г. – С.214-215.
7. Kochelaev B.I. Three-spin polarons and their elastic interaction in cuprates / B. I. Kochelaev, A. M. Safina, A. Shengelaya, H. Keller, K.

- A. Müller, K. Conder // Abstracts of International conference on Modern problems of high T_C superconductivity. – Yalta, 2002.
8. Safina A. Phase separation and spin relaxation in cuprates / A. Safina // Program and abstracts of International conference on Dynamic inhomogeneities in complex oxides. – Bled, 2003.
 9. Safina A. Two-dimensional spin correlations, elastic interactions and hole motion in CuO_2 plane / A. Safina // Abstracts of International conference on Theoretical trends in low-dimensional magnetism LD M2003. – Firenze, 2003.- p. 37.
 10. Кочелаев Б. И. / О природе исчезновения сигнала ЭПР от парамагнитных примесей в купратах при фазовом расслоении / Б.И. Кочелаев, А. М. Сафина // Тезисы докладов международной зимней школы физиков-теоретиков. – Екатеринбург-Челябинск, 2004. – стр.37.
 11. Белов С.И. Спиновая динамика и фазовое расслоение в ВТСП-материалах / С.И. Белов, А.Д. Инеев, А.М. Сафина, Б.И. Кочелаев // Тезисы докладов международной зимней школы физиков-теоретиков. – Екатеринбург-Челябинск, 2004. – стр. 115.
 12. Safina A. Nature of unusual behavior of EPR lines in cuprates with phase separation / A. Safina, B.I. Kochelaev // Abstracts of International conference on Nanoscale properties of condensed matter probed by resonance phenomena. – Kazan, 2004. – p.127.
 13. Shengelaya A. Microscopic phase separation and two type of quasiparticles in lightly doped $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ observed by electron paramagnetic resonance / A. Shengelaya, M. Bruun, B. I. Kochelaev, A. M. Safina, K. Conder H. Keller, K. A. Müller, // Abstracts of

International conference on Nanoscale properties of condensed matter probed by resonance phenomena. – Kazan, 2004. – p. 10.

14. Shengelaya A. Microscopic phase separation and two type of quasiparticles in lightly doped $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ observed by electron paramagnetic resonance / A. Shengelaya, M. Bruun, A. M. Safina, K. Conder // Актуальные проблемы физики конденсированных сред: Сб. Ст. – Казань, 2004. – С.313-322.
15. Б.И. Кочелаев, А.М.Сафина, Программа и сборник тезисов Юбилейной научной конференции физического факультета, 10 ноября 2004 г., Казань, Россия, стр.75.

Список цитируемой литературы

1. Bednorz J.G. Possible High T_C Superconductivity in the Ba-La-Cu-O System / J.G.Bednorz, K.A. Müller // Z. Phys. B. – 1986. - v.64. – pp. 189-193.
2. Зубарев Д.Н. Неравновесная статистическая термодинамика / Д.Н. Зубарев. – М.: Наука, 1971. – 416с.
3. Kochelaev B.I. Intrinsic EPR in $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$: Manifestation of Three-Spin Polaron / B.I. Kochelaev, J. Sichelschmidt, B. Elschner, W. Lemor, A. Loidl // Phys. Rev. Lett. – 1997. - v.79. – pp. 4274-4277.
4. Hasegawa H. Dynamical Properties of s-d interaction / H. Hasegawa //Prog. Theor. Phys. – 1959. – v.21. – pp.483-500.
5. Emery V.J Mechanism for high-temperature superconductivity / V.J. Emery, G. Reiter // Phys. Rev. B. – 1988. - v.38. – pp. 4547-4556.
6. Shengelaya A. Tilting mode relaxation in the electron paramagnetic resonance of oxygen-isotope-substituted $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4:\text{Mn}^{2+}$ /

- A. Shengelaya, H. Keller, K.A. Müller, B.I. Kochelaev, K. Conder // Phys. Rev. B. – 2001. – v.63 – pp.144513(1-9).
7. Kochelaev B.I. Spin dynamics in $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_{4+\delta}$ doped with Mn as revealed by an EPR study / B.I. Kochelaev, L. Kan, B. Elschner, S. Elschner // Phys. Rev. B. – 1994. – v.49. – pp.13106-13118.
 8. D. Mihailovic D. Finite wave vector Jahn-Teller pairing and superconductivity in the cuprates / Mihailovic, V.V. Kabanov // Phys. Rev. B. – 2001. – v.63 – pp.054505.
 9. Stepanov A.A. Observation of Cu^{2+} spin resonance in Gd_2CuO_4 / A.A. Stepanov, S. Huant, I.M. Vitebsky, P.Wyder, A. Chabanov, M.I. Kobets, V.A. Pashchenko, S.N. Barilo, D.I. Zhigunov // Phys. Rev. B. – 1995. – v.51. – pp.15596-15599.